

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Zvýšení produktivity laserového svařování plastů

Increase Productivity of Laser Beam of Plastic

Student:

David Nejezchleba

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2017

Zadání bakalářské práce

Student: **David Nejezchleba**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Zvýšení produktivity laserového svařování plastů**
Increase Productivity of Laser Beam of Plastic
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši laserového svařování.
2. Proveďte analýzu současného stavu.
3. Navrhněte novou koncepci laserového zařízení a pracoviště s ohledem na zvýšení produktivity.
4. Proveďte vyhodnocení a výpočet ROI.
5. Proveďte diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
LEGRAND,D.,BENDLER,J.T. *Handbook of Polycarbonate Science and Technology (Plastics Engineering)*.Marcel Dekker Inc.2000.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry

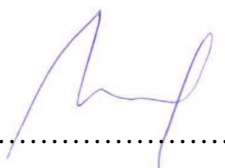

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Zábřehu 15. 5. 2017



.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem, byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Zábřehu 15. 5. 2017



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

David Nejezchleba

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Podlesí 185, 789 73 Úsov

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Nejezchleba, D. *Zvýšení produktivity laserového svařování plastů: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2017, 43 s. Vedoucí práce: Ochodek, Vladislav.

Tato bakalářská práce se věnuje zvýšením produktivity zařízení pro laserové svařování plastů. Teoretická část je věnována základům laserového svařování. Stručný popis a definice typů svařování. Další část se věnuje rozdělení plastových materiálů a jejich vhodností pro laserové svařování. Praktická část obsahuje analýzu současného stavu zařízení, na kterém proběhne opatření pro zvýšení produktivity. Detailní popis a rozbor úpravy zařízení je součástí experimentální části. Závěrem práce je výpočet ROI pro zjištění vhodnosti účelnosti investice.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Nejezchleba, D. *Increase Productivity of Laser Beam of Plastic: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2017, 43 p. Thesis head: Ochodek Vladislav.

Bachelor thesis is dealing increase productivity of machine for laser beam. The theoretical part is devoted to the basics of laser welding. Brief description and definition of welding types. Next part of thesis deals with a distribution of plastic materials and their suitability for laser welding. The practical part contains an analysis of the current device on which selected optimization will be applied to increase productivity. A detailed description and analysis of the device is included in the experimental part. The conclusion of the thesis is the calculation of the ROI to determine the suitability of the purposefulness of the investment.

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých značek a symbolů	7
Úvod	9
1. Laserové svařování	10
1.1. PRINCIP LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ	10
1.2. VÝHODY A NEVÝHODY LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ	11
1.3. ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ LASERŮ	12
1.4. BEZPEČNOST LASEROVÝCH ZAŘÍZENÍ	14
2. Laserové svařování plastů	16
2.1. ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ PLASTŮ	17
2.2. SVAŘITELNOST PLASTŮ	18
2.3. LASERY VHODNÉ PRO SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ	19
2.4. METODY SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ LASEREM	20
3. Hodnocení efektivnosti investic	24
4. Seznámení s produktem	25
4.1. SVAŘOVÁNÍ VE VÝROBĚ SVĚTEL PRO AUTOMOBILY	25
5. Zařízení pro laserové svařování plastů	30
5.1. TECHNICKÉ PARAMETRY STROJE	32
6. Návrh zvýšení produktivity stroje pro laserové svařování	34
6.1. MOŽNÉ VARIANTY ŘEŠENÍ	34
6.1.1. ÚPRAVA POHONU OTOČNÉHO STOLU	37
6.2. KONTROLA ZVÝŠENÍ PRODUKTIVITY	38
7. Výpočet návratnosti investice	41
8. Závěr	43
Seznam použité literatury	44

Seznam použitých značek a symbolů

Značka / Symbol	Význam	Jednotka
ROI	Return of investment (návratnost investice)	[%]
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	[-]
CW	označení kontinuálního svazku laseru	[-]
ms	milisekunda	[ms]
CO ₂	oxid uhličitý	[-]
Nd: YAG	označení pevnolátkového laseru	[-]
Er	erbium	[-]
Yr	ytterbium	[-]
kW	kilowatt	[kW]
mW	miliwatt	[mW]
UV	ultrafialové záření	[-]
nm	nanometr	[nm]
3D	trojdimenzionální	[-]
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	[-]
PA6	extrudovaný polyamid	[-]
PA66	polyamid 66	[-]
PC	polykarbonát	[-]
PE-HD	vysokohustotní polyethylen	[-]
PE-LD	nízkohustotní polyethylen	[-]
PMMA	polymethylmethakrylát	[-]
POM	polyoxymetylén	[-]
PP	polypropylen	[-]
PBT	polybutylentereftalát	[-]
SAN	styrén akrylonitril	[-]

TPE	termoplastický elastomer	[-]
PPS	polyfenylsulfid	[-]
PE	polyethylen	[-]
PS	polystyrén	[-]
PVC	polyvinylchlorid	[-]
PTFE	polytetrafluoretylen	[-]
PPE	polyfenylenether	[-]
PEEK	polyetherketon	[-]
PETP	polyethylen terephthalát polyester	[-]
PES	polyester	[-]
T _g	teplota skelného přechodu	[°C]
T _m	teplota tavení	[°C]
PLC	Programmable Logic Controller	[-]
kg	kilogram	[kg]
V _t	využitelnost zařízení	[%]
EUR	měna euro	[€]
W	Watt	[W]
μm	mikrometr	[μm]

Úvod

Svařování plastů je spojovací metodou pro vytvoření nerozebíratelného spoje pomocí tepla. Používají se různé technologie pro vytvoření takového spoje jako ultrazvukové svařování, svařování horkým tělesem, vibrační svařování, svařování horkým plynem nebo svařování laserem. Pro konkrétní aplikaci vybíráme technologii podle použitého typu polymerního materiálu, geometrie svařovaných dílů, požadovanou kvalitu svaru a hospodárnosti.

Laserové svařování má oproti ostatním technologiím několik výhod a to například relativně nízkou investiční cenu, žádnou údržbu a vysokou flexibilitu. Avšak průlom laserového svařování plastů nastal vyvinutím stabilních diodových laserů v druhé polovině 90. let. Vzhledem k těmto skutečnostem se tato technologie stala důležitou průmyslově používanou technologií. Nejširší využití nacházíme v automobilovém průmyslu, zdravotnickém průmyslu a elektronickém průmyslu.

Jedním z příkladů využití laserového svařování plastů v automobilovém průmyslu je výroba světlometů a zadních skupinových lamp. Náročnost nově vyráběných světlometů rapidně roste používáním LED diod a laserů, jako zdrojů světla. S tímto se váže větší množství a složitost plastových komponent, které jsou nedílnou součástí těchto výrobků. U takovýchto dílů je kladen důraz na spolehlivé spojení a to bez viditelnosti spojů.

Stále rostoucí výroba vyžaduje také zvýšení výkonu používaných zařízení z důvodu zrychlení výroby pro uvolnění kapacit novým projektům. Tato práce se zabývá právě možnostmi zrychlení stroje pro laserové svařování plastových dílů při výrobě světlometu. Jedná

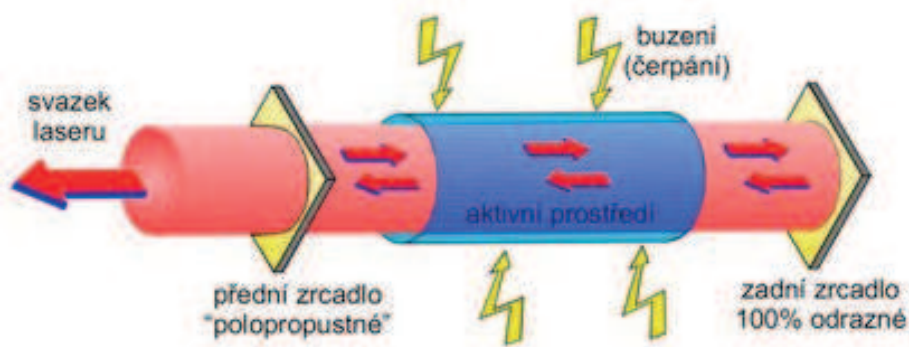
se o univerzální zařízení, které je osazováno specifickými přípravky pro svařování různých komponent. Účelem práce je zjištění možností zvýšení produktivity a následný výpočet efektivnosti investic.

1. Laserové svařování

Zkratka LASER vznikla z anglického slova vyjadřující zesilování světla stimulovanou emisí záření v originálním znění Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation [1].

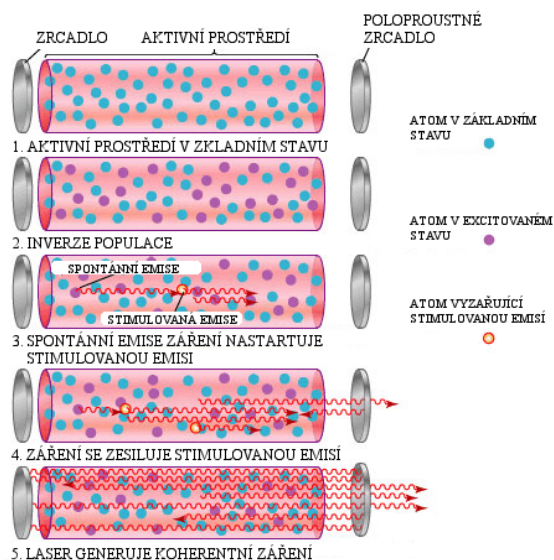
1.1. Princip laserového svařování

Obecně je jako laser označován optický zesilovač generující elektromagnetické záření za pomoci stimulované emise fotonů. Principem funkčnosti laseru je aktivní prostředí, které je buzeno, a tím dodáváme energii, která je za pomoci stimulované emise vyzářena v podobě laserového svazku. Pro vyzáření laserového svazku je dále potřeba vytvořit optický rezonátor, kterým jsou nejčastěji odrazná zrcadla [2]. Obecná schéma laseru si můžeme prohlédnout na obrázku 1.



Obrázek 1 - Obecné schéma laseru [3]

Základním principem funkčnosti laseru je, že v aktivním prostředí se nachází element v základním stavu s nižší energií nebo v excitovaném stavu s vyšší energií. Element z přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu vyzáří foton. Tento proces se děje sám od sebe a tudíž má prostředí snahu být ve stavu s co nejnižší energií (tzv. termodinamická rovnováha) my tento stav porušíme díky buzení a převedeme aktivní prostředí do excitovaného stavu a tento stav nazýváme inverzí populace. Nyní již můžeme dodanou energii přeměnit na laserový svazek pomocí stimulované emise (tzv. lavinový efekt) [2]. Znázornění procesu můžeme vidět na obrázku 2.



Obrázek 2 - Přeměna elementu na laserový svazek [3]

1.2. Výhody a nevýhody laserového svařování

Největší klady laserového svařování se sestávají z třech základních vlastností a těmi jsou:

- kolimovaný (nerozbíhající se) svazek laseru,
- monochromatický (jednobarevný) svazek laseru,
- koherentní (fotony jsou, jak časové, tak prostorové) svazek laseru.

Mezi další přednosti laserového svařování patří malé tepelné namáhání svařované součásti a zároveň nízké deformace, vysoká kvalita svaru, vysoká procesní stabilita, vysoká rychlost procesu svařování, reprodukovatelnost pro sériovou výrobu, svařování složitých tvarů, velmi malá tepelně ovlivněná oblast, použití pro téměř každý materiál, bezkontaktní a čisté zpracování. Díky těmto výhodám je svařování pomocí laseru velmi oblíbené. V průmyslových aplikacích zejména díky možnosti fokusovat svazek laseru do malého bodu a dosáhnout tak vysoké plošné hustoty energie, která je potřebná pro opracování daného materiálu. Kvalitě laserového svaru může dle četných pokusů konkurovat pouze svar svařený pomocí elektronového paprsku.

Mezi nevýhody laserového svařování patří vysoká pořizovací cena zařízení, založení svařovaných dílů musí být mnohem přesnější než u klasického svařování a materiály obsahující těkavé směsi nejsou vhodné pro laserové svařování [4].

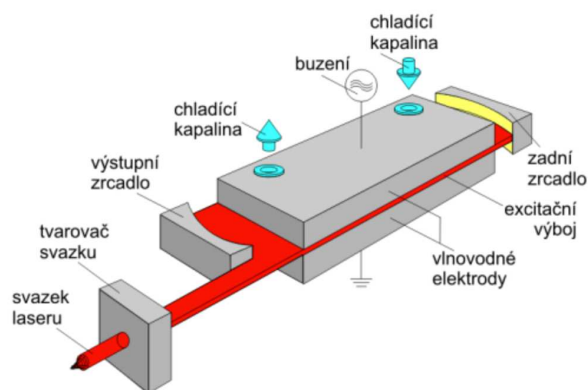
1.3. Základní rozdělení laserů

Nejčastější rozdělení laserů je podle typu aktivního prostředí nebo podle typu výstupního svazku. Podle výstupního svazku dělíme lasery na:

- CW (kontinuální – generování souvislého výstupního výkonu),
- pulsní (generování laserových pulzů – pro svařování v řádech *ms*).

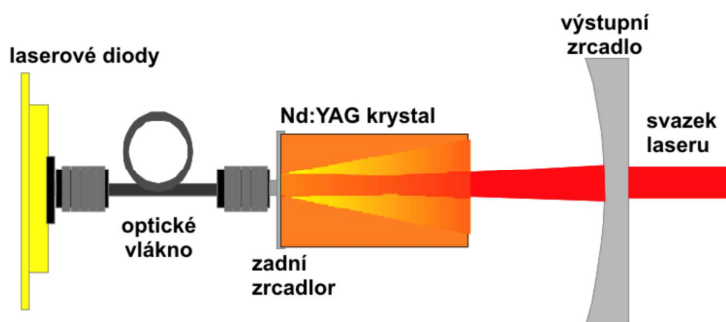
Rozdělení laserů podle typu aktivního prostředí je následující:

- plynové lasery – jako aktivní prostředí je využíváno plynu, který se budí několika způsoby (elektricky, opticky, atd.), nejznámějším představitelem tohoto typu laseru pro průmysl je CO₂ laser, jehož schématické zakreslení je na obrázku 3,



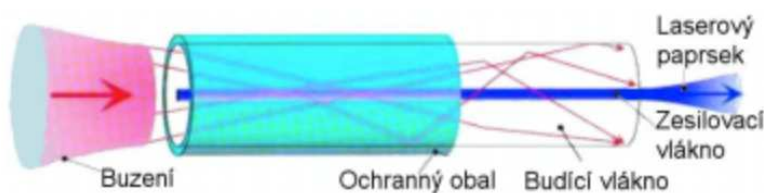
Obrázek 3 - Schéma CO₂ laseru [5]

- pevnolátkové lasery – jako aktivní prostředí je využíváno pevné látky, nejčastěji monokrystalu, buzení může u tohoto typu probíhat opticky výbojkami nebo laserovými diodami, typickým představitelem pro laserové svařování je Nd:YAG (obrázek 4), který využívá jako prostředí monokrystal yttrium aluminium granátu dopovaného atomy neodymu,



Obrázek 4 - Schéma Nd:YAG laseru [3]

- vláknové lasery – jedná se o speciální typ pevnolátkového laseru, kde je jako aktivní prostředí používáno optické vlákno dopované nejčastěji atomy erbia (Er) nebo yterbia (Yr), buzení probíhá pomocí laserových diod a je převáděno do aktivního vlákna optickým vláknem, architektura takového laseru je nazývána vlákno-vlákno a tudíž neobsahuje žádné opto-mechanické prvky, dnešní výkony takových laserů mohou dosahovat až 40 kW, jedná se o nejmodernější technologii laseru, schéma na obrázku 5,



Obrázek 5 - Schéma vláknového laseru [3]

- polovodičové (diodové) lasery – jako aktivní prostředí se využívá elektricky čerpaná polovodičová dioda, výkon takového laseru se pohybuje od mW až do kW , tyto lasery mají vysokou účinnost, ale trpí nízkou kvalitou výstupního svazku, v průmyslu se používá pro svařování a kalení,
- chemické lasery – využívá se především pro vojenské účely díky buzení chemickou reakcí jsou schopny dodat ohromné množství energie v krátkém čase,
- excimer lasery – jedná se o speciální třídu plynových laserů buzených za pomoci elektrického výboje, v tomto případě je aktivním elementem excimer což je speciální molekula, kde jedna z jejích složek je v excitovaném stavu, lasery této třídy pracují v ultrafialové oblasti a používají se v aplikacích, kde je potřeba vlnová délka z UV oblasti a vysoká energie pulsu,
- barvičkové lasery – nejvíce používaný laser pro vědu a výzkum, jedinečnost tohoto laseru je jejich laditelnost – mohou zářit na více vlnových délkách, jako aktivní prostředí je používáno organické barvivo [1].

1.4. Bezpečnost laserových zařízení

Bezpečnostní hlediska u laserových technologií se rozdělují do sedmi tříd, kde první třída je s nejmenším nebezpečím a poslední třída může způsobit trvalá zranění. Třídy se označují 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B a 4. Značení laserového nebezpečí je znázorněno na obrázku 6.

- Třída 1 – lasery s tímto označením jsou za provozních podmínek bezpečné, včetně sledování svazku za pomoci optických přístrojů. V této třídě se mohou vyskytovat i vysokovýkonné lasery, které mají zařízení ukrytu, a v případě otevření krytu se celý systém vypne.
- Třída 1M – tato třída zahrnuje laseru v rozsahu vlnových délek 302,5 nm do 4 000 nm, v tomto případě se pro sledování svazku nesmí použít optické přístroje.
- Třída 2 – do této třídy spadají lasery vyzařující záření v rozsahu vlnových délek od 400 nm do 700 nm, u kterých je ochrana zraku za normálních okolností zajištěna fyziologickými reakcemi například mrkacím reflexem, díky kterému není lidský zrak vystaven ostrému záření déle, jak 0,25 sekundy. Lasery zahrnuté v této třídě jsou limitovány výstupním výkonem, který je 1 mW v kontinuálním režimu. Výkon je možné zvýšit, ale doba záření nesmí být delší než 0,25 sekundy nebo záření nesmí být prostorově koherentní.
- Třída 2M – jedná se o třídu velmi podobnou třídě 2, ale je nebezpečné používat pro pozorování laserového svazku optické přístroje, jelikož v této třídě najdeme lasery s velkým průřezem paprsku nebo s velkou divergencí (rozbíhavostí).
- Třída 3R – v této třídě najdeme lasery vyzařující záření ve vlnových délkách od 302,5 nm do 10^6 nm. Přímé sledování uvnitř svazku může být potenciálně nebezpečné. Přípustná mez záření (AEL) je pětinasobně větší než u třídy 2 a pětinasobně větší než u třídy 1. Maximální výkon těchto laserů je 5 mW.
- Třída 3B – u laserů v této třídě je přímé ozáření svazkem za normálních okolností nebezpečné. Bezpečné je sledování difuzních odrazů. Výkon pro lasery pracující v kontinuálním režimu na vlnové délce v rozsahu 315 nm do daleké infračervené (far IR) je 0,5 W. Pro pulsní lasery, které mají vlnovou délku 400–700 nm je maximální hodnota energie pulsu 30 mJ.
- Třída 4 – kontakt s přímým zářením paprsků těchto laserů způsobuje vážná a trvalá poranění zraku. Nebezpečný je také difuzní odraz, pokud se nedodrží minimální

bezpečná vzdálenost. Tyto lasery mohou způsobit silná řezná poranění a popáleniny. Při kontaktu s hořlavými materiály hrozí nebezpečí vznícení. Do této třídy jsou zahrnuty všechny lasery s vyšším výkonem nebo vyšší pulsní energií pulsu než lasery třídy 3B [6].



Obrázek 6 - Označení laserového nebezpečí [6]

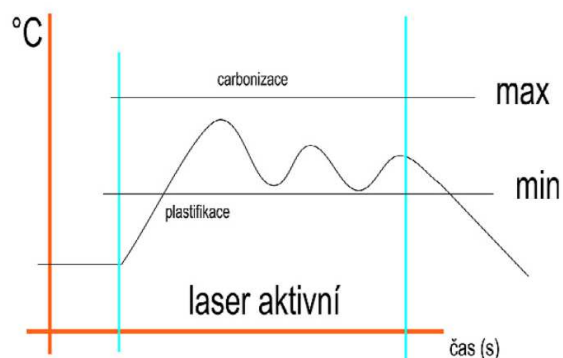
2. Laserové svařování plastů

Moderní technologie laserového svařování termoplastických umělých hmot je inovativní postup pro realizaci vysokých procesních rychlostí a kvalit svaru. Proces jako takový je rychlý, skoro bez produkce odpadu a je velmi přesný. Výsledný svar je dokonalý a sotva viditelný. Jeho obrovskou výhodou je oproti obvyklým metodám pro svařování kvalitní spojení materiálů s minimální degradací jejich vlastností. Jednou z dalších výhod je malá termická a mechanická zátěž pro svařovaný díl [4, 7].

Mezi přednosti laserového svařování plastů patří:

- bezkontaktní metoda svařování,
- vysoká kvalita svaru,
- vyšší hloubka průvaru,
- cílené, malé a dobře lokalizované tepelné zatížení,
- vysoká produktivita,
- povrchový vzhled,
- snadnější možnost automatizace,
- svařování při vysokých teplotách,
- možnost zpracování 3D obrysu (vysoká flexibilita),
- svařovací linka není vidět,
- výsledkem je odolný proti opotřebení,
- velmi flexibilní.

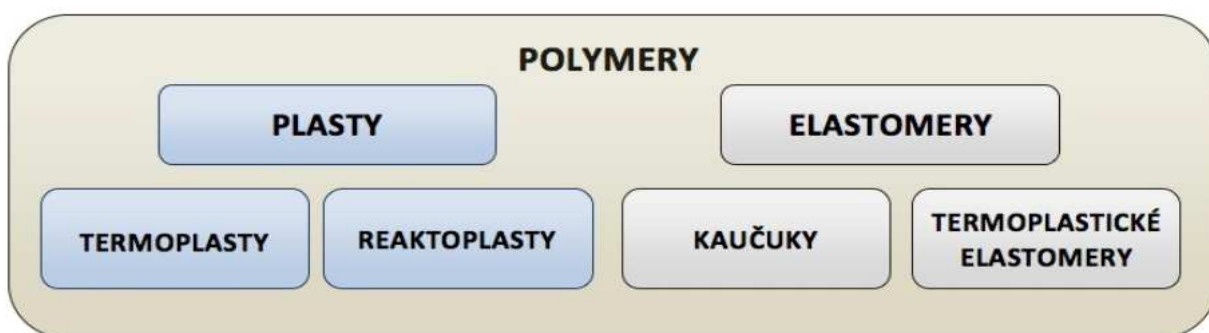
Lasery pro svařování termoplastických polymerů, se pohybují v rozsahu výkonu od 10 do 50 W. Průběh svařování termoplastických materiálů, si můžeme prohlédnout na obrázku 7.



Obrázek 7 - Princip laserového svařování termoplastických polymerů [8]

2.1. Základní rozdělení plastů

Podstatnou část plastů tvoří organické makromolekulární látky (polymery) a dále přísady (aditiva), které mají za účel specificky upravovat vlastnosti materiálu. Základním rozdělením polymerů je rozdělení na elastomery a plasty. Plasty dále rozdělujeme na termoplasty a reaktoplasty [9, 10]. Grafické rozdělení viz obrázek 8.



Obrázek 8 - Rozdělení polymerních materiálů [11]

Elastomery jsou velice elastické polymery, které lze za normálních podmínek malou silou deformovat bez porušení. Největší skupinou elastomerů jsou kaučuky, z kterých se vyrábí pryže. Dalšími zástupci jsou termoplasty, které lze ohřevem převést do nataveného stavu nebo viskózního toku a následným ochlazením nechat ztuhnout při teplotách daných pro konkrétní materiál. Posledním zástupcem jsou reaktoplasty, které při zpracování prochází chemickou reakcí a účinkem tepla, záření nebo síťovacích činidel vytvářejí prostorově zesíťované struktury, ve kterých se původní molekuly vzájemně spojí kovalentními vazbami. Tento proces je nazýván vytvrzováním. Tento plast je netavitelný a nerozpustný [10]. Tabulku teplot různých druhů plastových materiálů můžeme vyčíst z tabulky 1.

Tabulka 1 - Lineární polymery – teploty skelného přechodu / teploty tavení

Lineární polymery (termoplasty)			
Název a zkratka	Struktura	T_g	T_m
		[°C]	[°C]
Polyethylen (PE) - lineární	krystalická (silně)	-122	137
Polyethylen (PE) - rozvětvený	krystalická (středně)	-122	110
Polypropylen (PP) – izotaktický	krystalická	-24	176
Polystyren (PS)	amorfní	90	-
Polyvinylchlorid (PVC)	amorfní	75	-
Polytetrafluorethylen (PTFE)	amorfní	-97	330
Polymethylmethakrylát (PMMA)	amorfní	105	-
Polyoxymethylen (POM)	krystalická	-40	181
Polyamid 6 (PA6)	krystalická	45	225
Polyamid 66 (PA66)	krystalická	65	265
Polyfenylenether (PPE)	krystalická (málo)	210	268
Polyetheretherketon (PEEK)	krystalická	154	334
Polyethyltereftalát (PETP)	krystalická (středně)	70	267
Polykarbonát (PC)	amorfní	144	-
Polyfenylsulfid (PPS)	krystalická	185	285
Polyethersulfon (PES)	amorfní	230	-

2.2. Svařitelnost plastů

Z fyzikálního hlediska je možné svařovat pouze termoplastické materiály. Nejlepších výsledků je vždy dosaženo v případě použití stejných materiálů, ale lze svařovat kombinace termoplastů. Z hlediska nadmolekulární struktury není možné svařovat materiály s amorfní strukturou a částečně krystalické materiály. Princip pro svařování termoplastů je, že se musí do svarové části přivést dostatečné množství tepla pro natavení materiálů. Kvalitního sváru z hlediska pevnosti dosáhneme vedením energie což je určitý poměr mezi výkonem a rychlostí svařování. Nízké vedení energie může způsobit adhezní přilnutí, zatímco příliš vysoká energie může způsobit rozklad materiálu. Pro sledování teploty se nejčastěji používá pyrometr, který umožňuje sledovat teplotu výkonu laseru bezkontaktně a on-line. Pro kvalitní svar za pomoci laseru je nutné dodržet také dostatečný přítlak svařovaných ploch. Maximální mezera mezi dvěma materiály je pro svařování laserem 0,1 mm. Kvůli této podmínce je vyžadována velká kvalita plastových dílů již z formy a dále kvalitní přípravek s přítlaky obou dílů. Během svařování jeden z materiálů je absorpční a laserový paprsek zachytí, a druhý materiál je transparentní, kterým paprsek projde. Díky kontrole tepla během svařování nedojde k přehřátí materiálu a následně k jeho

spálení, karbonizaci a degradaci svarového spoje. Takovýto systém je nenáročný na servis a kontrolu díky nekontaktnímu svařování a dále má vysokou životnost spojenou s nižšími náklady na provoz. Na běžné kombinace svařovatelných termoplastických polymerů se můžeme podívat v tabulce 2 [4, 7].

Tabulka 2 - Svařitelnosti termoplastických polymerů (*dobré, střední, špatné, vůbec*)

	ABS	PA6	PA66	PC	PE-HD	PE-LD	PMMA	POM	PP	PS	PBT	SAN	TPE	PPS
ABS	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
PA6		●			●	●			●	●	●			
PA66			●	●	●	●			●	●	●			
PC	●		●	●	●	●			●	●	●	●		●
PE-HD	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
PE-LD	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
PMMA	●				●	●	●	●	●	●				
POM	●				●	●	●	●	●	●				
PP	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
PS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
PBT	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●		
SAN	●			●	●	●	●		●	●	●	●		
TPE									●	●			●	
PPS				●										●

2.3. Lasery vhodné pro svařování plastů

V kapitole 1.3 je uvedeno rozdělení a typy laserů. Nejvíce využívanými lasery pro svařování plastů jsou:

- plynné lasery -> CO₂,
- pevnolátkové lasery -> Nd:YAG,
- polovodičové (diodové) lasery.

V tabulce 3 najdeme porovnání nejvýznamnějších hodnot výše uvedených typů laserů používaných pro laserové svařování plastů [7].

Tabulka 3 - Porovnání hlavních parametrů laserů pro svařování plastů [8]

Vlastnosti	Typ vybraného laseru		
	CO ₂	Nd:YAG	Polovodičový
Vlnová délka [nm]	10600	1064	780-980
Účinnost [%]	5–10	1–3	30–40
Střední výstupní výkon [kW]	≥ 30	≥ 3	≥ 2
Cena [€ / 10W]	1 500,00	6 000,00	1 500,00

Největším rozdílem, jak můžeme vidět v tabulce 2 je vlnová délka emitovaného záření, které je u polovodičového (diodového) laseru, tak u Nd:YAG laseru blízko infračervené oblasti, a to v případě polovodičového laseru 780–980 nm a v případě Nd:YAG 1064 nm. Hodnota emitovaného záření má obrovský vliv na absorpci paprsku v plastu. Vedení laseru probíhá pomocí optického kabelu. Dalším výrazným rozdílem je účinnost, která je největší v případě použití polovodičového (diodového) laseru a to 30–40 % [7].

2.4. Metody svařování plastů laserem

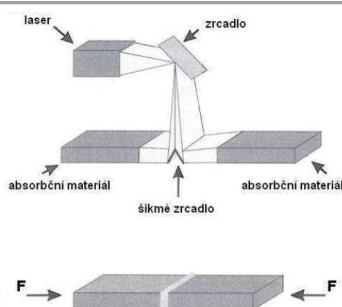
Pro svařování laserem plastových materiálů používáme dvou základních svařovacích procesů:

- a) Svařování natupo.
- b) Transmisní.

U laserového svařování natupo rozeznáváme dvě metody, a to svařování s šikmým zrcadlem a bez šikmého zrcadla. Svařování natupo je variantou, která se nepoužívá, protože během procesu je vytlačeno velké množství taveniny na povrch.

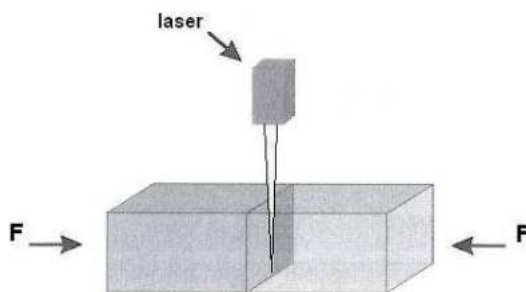
- svařování natupo s šikmým zrcadlem,
- svařování natupo bez šikmého zrcadla.

Odraz laserového paprsku od šikmého zrcadla do svarové oblasti vytvoří teplo, díky kterému se spojované části nataví a následně se přitlačnou silou spojí. Důležitými aspekty této metody jsou energie dodaná laserem do svarových oblastí, tlak a doba trvání. Postup svařování touto metodou si můžeme prohlédnout na obrázku 9 [12].



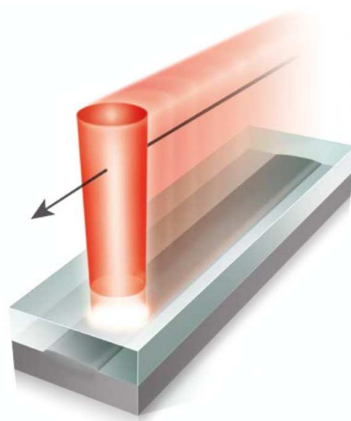
Obrázek 9 - Svařování natupo s šikmým zrcadlem [12]

Rozdíl oproti předchozí metodě je ten, že svařované plochy jsou pod vlivem přítláčné síly, již před zahájením svařování a laser působí přímo do svarové oblasti. Postup znázorněn obrázkem 10.



Obrázek 10 - Princip svařování natupo bez šikmého zrcadla [12]

Transmisní neboli propustné svařování (transmission welding) je nejpoužívanějším procesem pro laserové svařování plastů. Touto metodou je možné spojovat materiály s různými absorpčními vlastnostmi. Princip spočívá v průniku laserového paprsku spojovanou (transparentní) částí do absorpční části, v které se energie paprsku přemění v teplo a dojde k natavení absorpčního materiálu spolu s transparentním a dojde ke spojení. Během svařování, a to v začátku nebo ke konci je možno použít přítláčný tlak ve spojované oblasti [14, 15]. Na obrázku 11 si můžeme prohlédnout laserový paprsek prostupující materiálem.



Obrázek 11 - Princip transmisního (propustného) svařování [14]

Rozlišujeme čtyři metody transmisního svařování laserem podle geometrie svařování.

- obrysové (konturové) svařování,
- kvazi-simultánní svařování,
- simultánní svařování,
- svařování s maskou.

Obrysové neboli konturové svařování (contour welding) je založeno na svařování pomocí laserového paprsku kopírováním kontury. Paprsek je veden optickým vláknem mezi laserovým generátorem a optikou laseru. Pracovní rychlost je závislá na výkonu, jelikož tyto parametry určují množství energie dodané do spojované oblasti. Hlavní podmínkou pro použití této metody pro svařování je kontakt mezi spojovanými díly. Výhoda této metody spočívá v možnosti svařit téměř jakákoli 3D kontura i na špatně dostupných místech za předpokladu použití šestiosého robota [14, 15].

U metody kvazi-simultánního svařování (quasi-simultaneous welding) je veden laserový svazek pomocí skenovacích zrcadel velkou pracovní rychlostí podél kontury svařování. Díky vysoké rychlosti svařování je tato metoda velmi flexibilní a celková spojovaná plocha může být bodovým zdrojem energie laserového svazku stejnoměrně ohřáta a plastifikována. Pro svařování větších součástí je nutno použít více skenovacích systémů. Tuto metodu můžeme použít v sériové výrobě [12].

U metody simultánního svařování (simultaneous welding) je stejně, jako u předchozí svařovaná plocha stejnoměrně zahřívána. V případě této metody je svařovaná plocha ozářena v jednom kroku. Pro správné přímkové ozáření je důležité vhodné uspořádání diod. Není zapotřebí pohybu mezi laserem a svařovanými součástmi. Neroztavená oblast působí jako

rozpěrka zabraňující toku taveniny. Vzniklá natavení lze skrýt za správně zvolenou geometrii [12, 15].

Metoda svařování s maskou (mask welding) je prováděna pomocí diodového laseru. Část svařovaných součástí, která nemá být svařena je zakryta maskou. Touto metodou můžeme svařovat přímé, zakřivené čáry o různých tloušťkách nebo svařovat plošné části [15].

3. Hodnocení efektivnosti investic

K hodnocení investic použijeme statickou metodu, a to metodu výnosnosti (návratnosti) investice. Doba návratnosti investice tzv. ROI (Return Of Investments) je jedním z hlavních ukazatelů pro hodnocení investic, který nám udává dobu, po kterou bude ohrožen vložený kapitál. Touto metodou se tedy vyhodnocuje ziskovost a rentabilita. Abychom mohli hodnotit investici je potřeba určit kapitálové výdaje (náklady) na investici. Dalším krokem je odhad budoucích peněžních příjmů. V neposlední řadě je potřeba určit náklady na kapitál, který byl použit k financování investice. Nakonec si vypočítáme současnou hodnotu očekávaných výnosů [16].

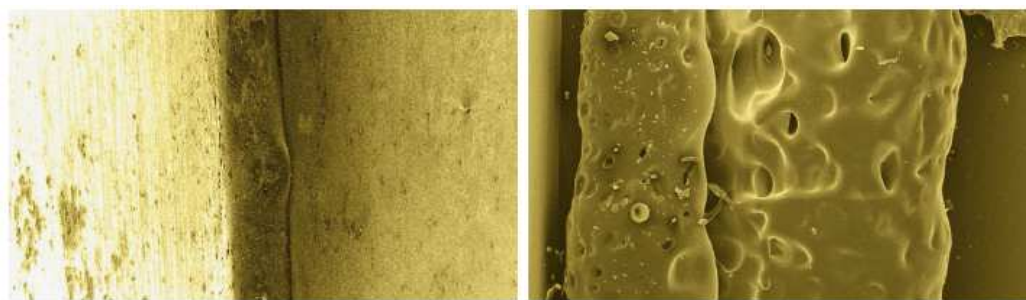
$$ROI = \frac{zisk}{investice} \times 100 [\%] \quad (1)$$

4. Seznámení s produktem

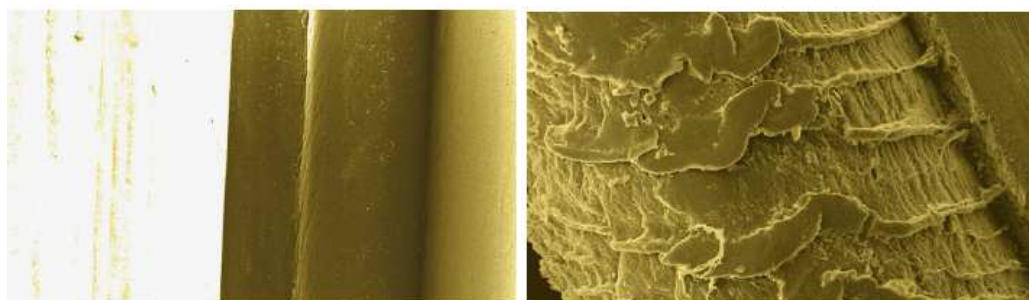
Produkt, který se vyrábí ve společnosti Hella Autotechnik NOVA, s.r.o. jsou světlomety pro různé automobilové výrobce. Portfolio zákazníků je široké a mezi hlavní zákazníky patří VW, Audi, BMW a Škoda Auto. Světlomety se skládají v dnešní době z mnoha komponent převážně z plastových materiálů, které jsou vstřikovány pomocí lisů do specifických forem. Základními díly světlometu jsou pouzdro, světelné funkce, jako jsou reflektory nebo moduly a sklo. Pouzdro slouží, jako zástavba pro komponenty světlometu a je uchyceno ke karoserii automobilu. Sklo je lepeno k pouzdru a je velmi namáháno vnějšími vlivy, jako jsou například déšť, UV záření, prach a podobně. Je nutné jej tedy chránit ochrannou vrstvou laku. Světelné funkce se od sebe odlišují zvolenými zdroji světla. V současnosti jsou nejpoužívanějšími zdroji LED diody, které jsou užívány jak v modulech, tak reflektorech. Tyto funkce plní, jak legislativní požadavky, tak designové požadavky. Nedílnou součástí světlometů jsou rámečky, které určují specifický design zákazníka a v případě montáže, také složitost světlometu. Tyto rámečky se skládají z mnoha dílů a jsou na ně kladeny vysoké kvalitativní požadavky. Z tohoto důvodu vzniká potřeba spojovacích technologií, jako je svařování.

4.1. Svařování ve výrobě světel pro automobily

Ve společnostech zabývajících se výrobou světlometů se můžeme setkat, jak s laserovým svařováním vnitřních plastových komponent a světelných funkcí, tak i se samotným svařováním kompletních světel pomocí laseru. Svařováním kompletních světel je myšleno například svařování zadních skupinových svítilen. U zadních světel je svařováno pouzdro se sklem, kde pouzdro je z materiálu ABS a sklo z materiálu PMMA. Laserové svařování nahrazuje v tomto případě vibrační svařování, svařování pomocí teplého plynu a svařování pomocí tepelných elementů. Tyto druhy svařování jsou nahrazovány zejména nástupem komplikovanější geometrie svaru, rychlosti svařování, nákladům na svařovací nástroj a vzhledu svaru. Dnes se upouští od používání optiky na krycích sklech zadních lamp a tím vzniká i nárok na dekorativní vzhled svaru, který již není možné za optiku schovat. Kvalita svaru je zobrazena na obrázcích 12 a 13. Laser ke svařování nám umožňuje tedy dokonalý vzhled svaru a nové konstrukční možnosti při návrhu vnějšího tvaru lampy.

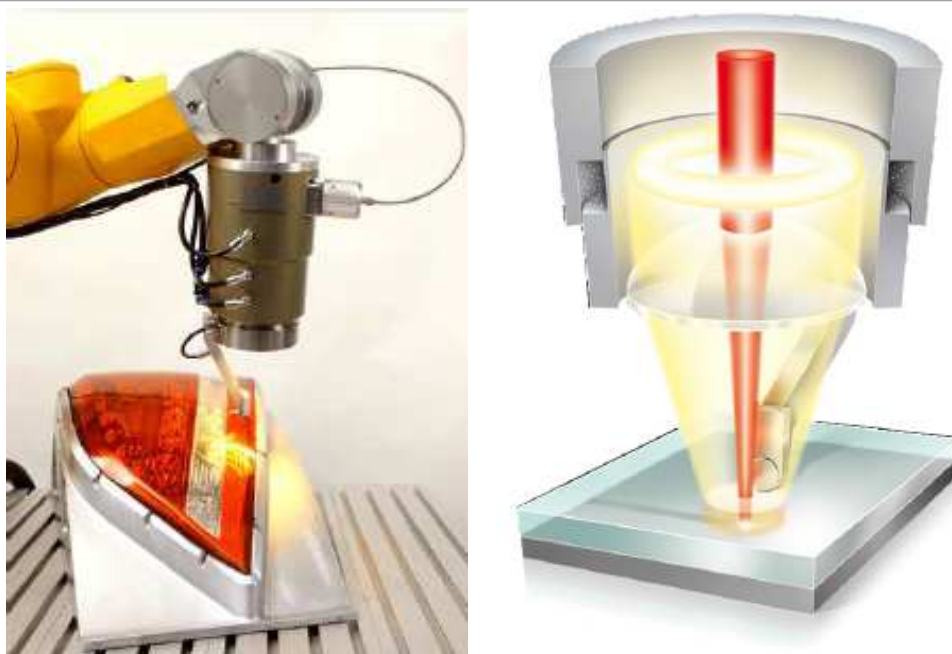


Obrázek 12 – Porovnání struktury laserového svaru vůči svaru tepelnými elementy
(50 x zvětšeno) [18]



Obrázek 13 – Porovnání struktury laserového svaru vůči vibračnímu svařování (150
x zvětšeno) [18]

Jednou ze společností vyrábějící zařízení pro laserové svařování zadních lamp je firma LPKF. Jedná se o zařízení TwinWeld 3D. Toto zařízení je určeno pro hybridní svařování, kde se jedná o kombinaci halogenové lampy a laseru. Halogenová lampa dodává energii navíc do svařovací zóny pomocí polychromatického záření. Tato kombinace zvyšuje rychlost zpracování a vytváří vzhledově výborně vypadající svary. Díky této technologii jsme schopni vytvářet spolehlivé, dokonalé a téměř bezstresové svary. Zmenšení napětí je docíleno postupným ohříváním a chlazením plastů. Rychlejší cyklus svařování je způsoben přehřátím svaru v halogenovém poli, protože plast vyžaduje méně energie z laseru, aby dosáhl bodu tavení. Bez této hybridní technologie je svařování obrysu omezeno přibližně na 20 milimetrů za sekundu. Pro vytvoření dokonalého svaru je nutné zajistit bezchybný dotyk spojovaných materiálů. Mezery jsou zpravidla způsobeny nedokonalými a měnícími se geometriemi z lisovaného plastu. Pro zajištění styku materiálů používáme upínací síly. V případě hybridního svařování od firmy LPKF (obrázek 14) je upínací síla zajištěna pomocí válcového ramena, které je připevněno ke svařovací hlavici. Přestože upínací síla může překonat geometrické nesrovnalosti, je potřeba lisovat součásti dle tolerancí. Zadní lampa svařovaná tímto strojem ve firmě Hella je pro Renault Scénic.



Obrázek 14 – LPKF TwinWeld 3D [17, 18]

Zaměříme-li se na světelné funkce, tak je možné v případě použití LED modulů použít laserové svařování čočky s držákem čočky. Transparentním materiálem je v tomto případě čočka a absorpčním materiálem je držák. V tomto případě je využíváno švové svařování obvykle na čtyřech místech čočky pro spojení s držákem. Díky tomuto spojení odpadá skleněná čočka s nutností přídavného materiálu pro spojení skleněné čočky a plastového držáku [18, 19].

Jako příklad dílů, které se svařují pomocí laseru je stranové sklíčko pro světlomet VW Golf A7 (obrázek 15). Tato skupina skládající se ze dvou plastových dílů je svařena na třech místech. Svařovací čas v případě svařování dvou kusů v jednom přípravku trvá 22 s.



Obrázek 15 - Přípravek s díly svařovanými pomocí laserového svařování VW Golf A7

Svařovat můžeme také rámečky do krycího skla. V tomto případě se musí dbát nato, aby se nesvařovalo ve funkčních plochách. Příkladem takového svařování je světlomet pro VW Crafter (obrázek 16), kde se spojuje krycí sklo s rámečkem pomocí jednoho svařovacího švu. Cyklus svařování je 7 s.



Obrázek 16 – Svařená skupina skla VW Crafter

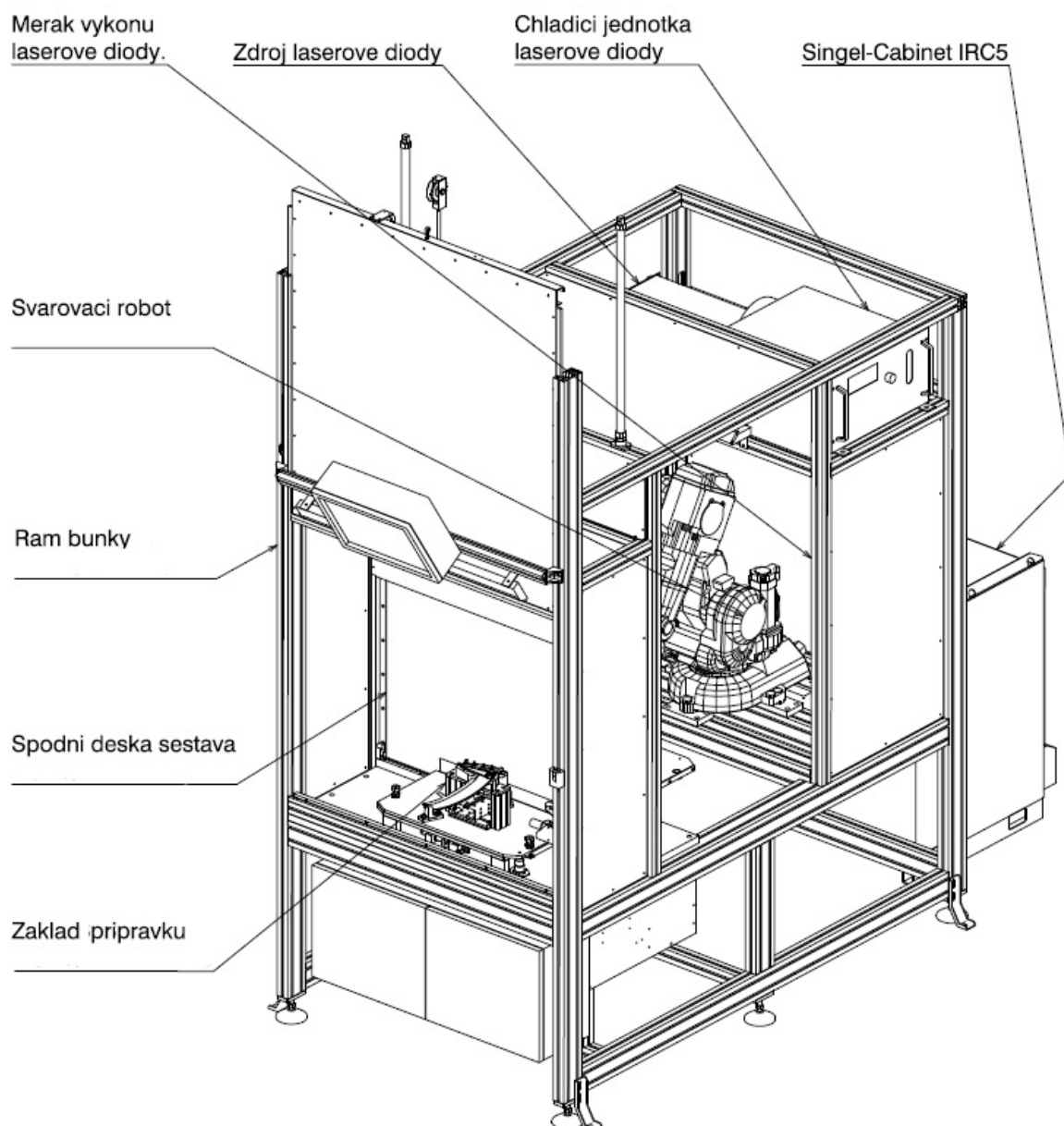
Příkladem designového rámečku kompletovaného pomocí svařování, je skupina rámu pro projekt Audi A6. Tento rámeček je součástí nejvyšší verze světlometu tzv matrix. Skupina rámu je svařena na osmi místech (obrázek 17). Cyklus je v tomto případě 38 s.



Obrázek 17 – Dekorativní rámeček Audi A6

5. Zařízení pro laserové svařování plastů

Analyzované zařízení je universální robotizované pracoviště k bodovému a švovému laserovému svařování plastových materiálů. Znázornění a popis na obrázku 18. Univerzální proto, že zařízení lze osadit přípravky, které umožní svařovat různé díly. Ke svařování se používá laserová dioda s kolimovaným paprskem. Princip je takový, že se svařují dva díly, které se v ploše dotýkají. Vrchní z dvojice svařovaných dílů musí být pro laserový paprsek průhledný, spodní díl musí energii laserového paprsku pohlcovat. V místě pohlcení laserového paprsku vzniká teplo, které oba díly natavuje. Aby bylo možné svařovat díly na libovolném místě, nese laserovou diodu robot. Robot je umístěn v pracovní buňce, na které jsou kryty chránící před laserovým zářením. Pracovní buňka obsahuje otočný stůl, který nese dvojici přípravků proto, aby v době, kdy robot svařuje, obsluha mohla vyjímat a zakládat nové díly. Rám pracovní buňky nese zbylé části stroje. V buňce je ukotven robot s laserovou diodou, otočný stůl, který nese dvojici přípravků, ochranné krytování, elektrický zdroj k diodě, chladicí jednotka, měřič výkonu laserové diody. Pro přístup obsluhy k přípravku slouží čelní dveře, pro přístup do pracovního prostoru robota slouží boční dveře. Pracovní prostor robota od prostoru obsluhy je oddělen vnitřními dveřmi.



Obrázek 18 – Robotické pracoviště pro laserové svařování

Řízení procesu probíhá pomocí PLC systému s podřízenými prvky, jako jsou ventilové bloky, manipulátor s laserovou diodou, laserový modul, chlazení pro laser a zobrazovací panel. Pro kontrolu stavu stroje, polohy dveří apod. jsou na zařízení použité různé typy senzorů, které komunikují s PLC systémem pomocí sběrnice PROFIBUS.

Dioda emitující paprsek laseru je nesena manipulatorem na robotickém rameni. Tímto systémem je zaručena přesnost a správná poloha diody vůči svaru. Robotický manipulátor pro tuto aplikaci je šestiosý a díky tomu můžeme svařovat i velice složité dílce. Součástí zařízení je robotický manipulátor společnosti ABB Robotics. Přesný typ je ABB IRB 140.

Sestava laseru od společnosti LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH obsahuje polovodičovou diodu, která emituje laserové záření, generátor, chlazení a kabeláž.

5.1. Technické parametry stroje

Stroj se skládá z konstrukce poskládané z profilů firmy Alutec, která je osazena rozvaděčem, sestavou laseru a obsahuje ochranné krytování, které je upevněno na rámu stroje a chrání obsluhu před laserovým zářením. Ochranné krytování zajišťuje, že se laserové záření nedostane vně krytu. Kryty můžeme rozdělit na pevné a pohyblivé. Základní údaje jsou přehledně vypsány v tabulce 4.

Tabulka 4 - Základní parametry zařízení pro laserové svařování

Rozměry:	1200 x 2860 x 3192 mm
Hmotnost:	675 kg
Přívod vzduchu:	0,6 MPa
Instalovaný příkon:	2500 VA
Třída laseru	Třída 1. Po otevření krytu třída 4!

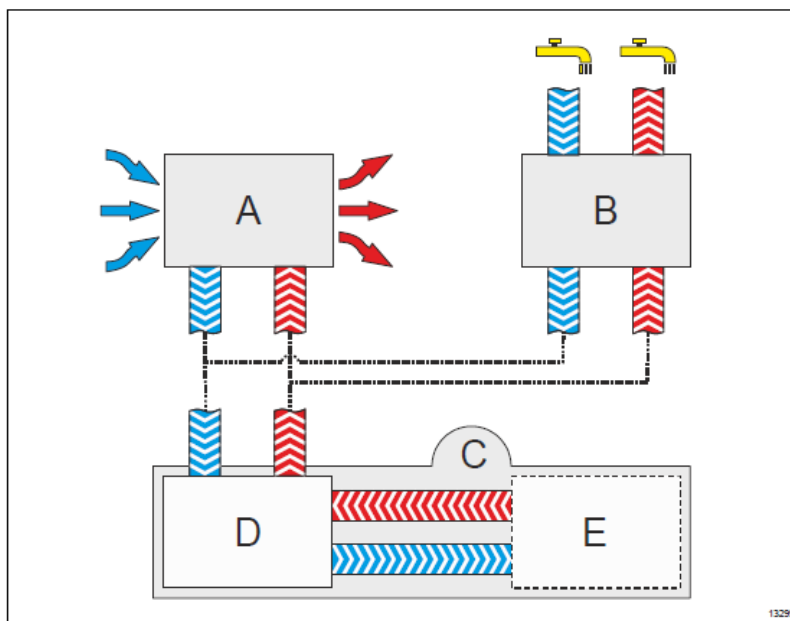
Použitá polovodičová dioda je ze série FG. Tato série je vhodná právě pro laserové svařování plastových materiálů. Přesný typ laserové diody je LIMO60-F100-DL938-EX1912. Parametry diodového laseru vyčteme z tabulky 5.

Tabulka 5 - Základní parametry laserové diody

Výstup [W]	Ø vláknového jádra [μm]	Vlnová délka [nm]
60	100	938

Materiály svařovatelné tímto typem polovodičové diody jsou PP, PC-HT, PMMA, PBT-ASA a ABS. Laserová dioda je nástrojem robota. Je připevněna na přírubě jeho šesté osy. Dále je robot nositelem vodičů a hadic, které vedou do diody. K usnadnění programování drah svařování je možné k nástroji upevnit maketu svazku paprsků laserové diody. Díky této maketě můžeme jednoduše naprogramovat dráhu pohybu pro svařování. Chlazení laserové diody je pomocí zařízení firmy TermoTek. Přesný typ P300. Toto chlazení bylo zkonstruováno, aby udržovalo teplotu uživatelského média (deionizovaná voda) mezi dvěma předem stanovenými limity pomocí procesu chlazení. Bylo navrženo

tak, aby fungovalo za nepřetržitého provozu za účelem chlazení právě laserových zařízení. Chladicí jednotka funguje uvnitř systému uzavřeného okruhu. Schématické zobrazení včetně popisu je znázorněno na obrázku 19.



Obrázek 19 - Pracovní princip chlazení

A – chladicí okruh pouze pro chlazení vzduchem

B – chladicí okruh pouze pro chlazení vodou

C – chlazení okruhu

D – výměník tepla (nádrž na vodu)

E – spotřebitel

6. Návrh zvýšení produktivity stroje pro laserové svařování

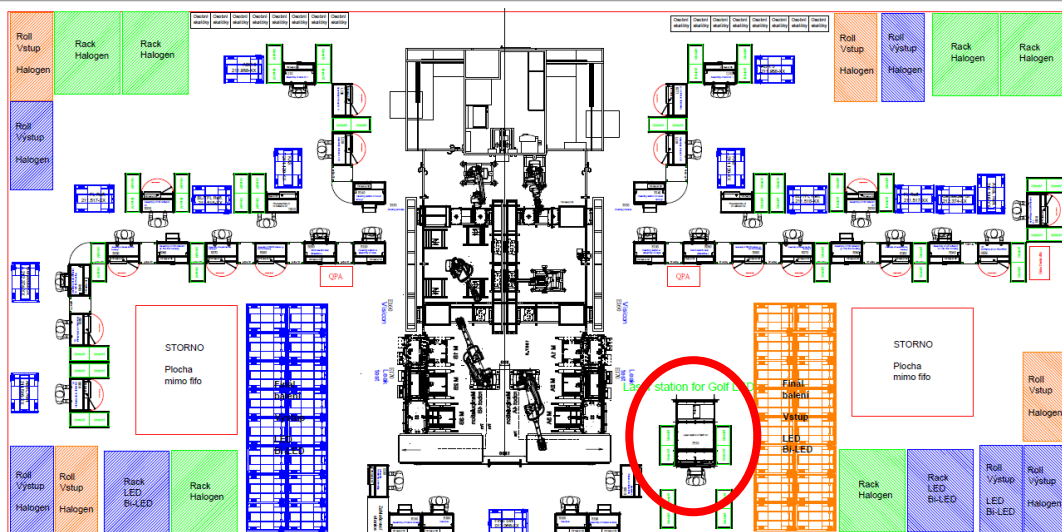
Abychom mohli zajistit zvýšení produktivity je potřeba urychlit cyklus čas stroje. Strojní čas je takový čas, který nám určuje cyklus čas stroje. Je to ten čas během kterého pracuje pouze stroj a obsluha stroje může vykonávat jinou práci. Zrevidujeme-li si aktuální montážní časy, které nejsou ovlivněny obsluhou stroje, jako např. zakládání dílů do specifických přípravků, zůstalo nám v případě výše uvedeného stroje uzavření ochranných dveří, otočení stolu do pracovní polohy, svařovací cyklus, otočení stolu do základní polohy a otevření ochranných dveří. Nejvýznamnějšími strojními časy jsou svařování, které závisí na složitosti a rozměrech svařovaných komponent, otáčení pracovního stolu a otevírání dveří.

6.1. Možné varianty řešení

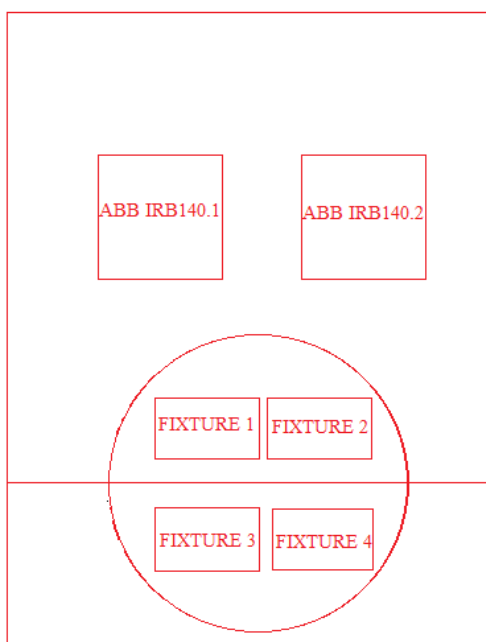
Mezi možné řešitelné varianty úpravy zařízení patří:

- a) Zvýšení počtu laserových sestav.
- b) Úprava pohonu otočného stolu.

Jako první možností je navýšení počtu laserových sestav. Mohli bychom svařovat více kusů v cyklu a tím bychom se dostali ke značnému zvýšení vyrobených kusů. Tímto řešením by však vzniklo několik aspektů, které jsou v sériové výrobě nežádoucí. Přidáním druhé laserové sestavy by vznikla nutnost dalšího robotického ramena a tím významně zvětšený požadavek na rozměr stroje což je nežádoucí vzhledem k současné pozici zařízení v layoutu montážní linky. S dnešními komplikovanými světlotety, kdy je potřeba více pracovišť na kompletaci samotného světlotetu, je tohle neakceptovatelné. Samotné umístění pracoviště v layoutu montážní linky si můžeme prohlédnout na obrázku 20. V případě nového zařízení pro nový projekt by se tohle řešení dalo použít za předpokladu, že by se s většími rozměry počítalo. Dalším aspektem, který není pro úpravu stroje vhodný je navýšení ceny stroje o vysokou částku (robotické rameno, laserová sestava, komplikovanější konstrukce a montáž stroje). V neposlední řadě je nutno podotknout, že s touto úpravou by bylo nutné místo dvou zakládacích přípravků používat čtyři, což opět navyšuje cenu a potřebu skladovacích prostor pro tyto přípravky. S dvojnásobným počtem přípravků a se zvětšením otočného stolu je nutné počítat se zvýšením váhy stroje a s tím spojeným pohonem pro otáčení o mnohem větší síle než doposud. Použití vyššího počtu laserových sestav by však bylo nejoptimálnějším řešením. Schématickou zakreslení zařízení po zdvojení laserových sestav si můžeme prohlédnout na obrázku 21.

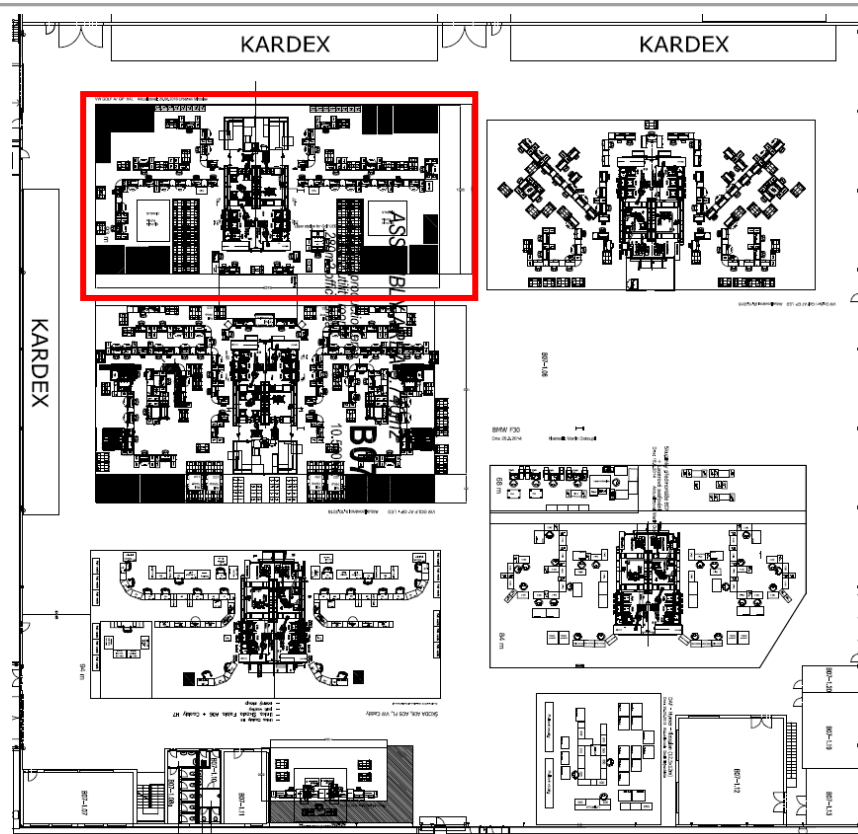


Obrázek 20 - Umístění pracoviště v layoutu linky



Obrázek 21 – Schéma rozšířeného zařízení

V případě, že bychom uvažovali zařízení umístit mimo layout linky a přemístili by jsme jej do jiné montážní haly, nebo na jiné místo v rámci současné haly musíme brát v potaz navýšení manipulačních prací v potřebě dílu či zaskladňování a tudíž další zabránění prostoru v podobě míst pro skladový materiál. Detail haly viz obrázek 22.

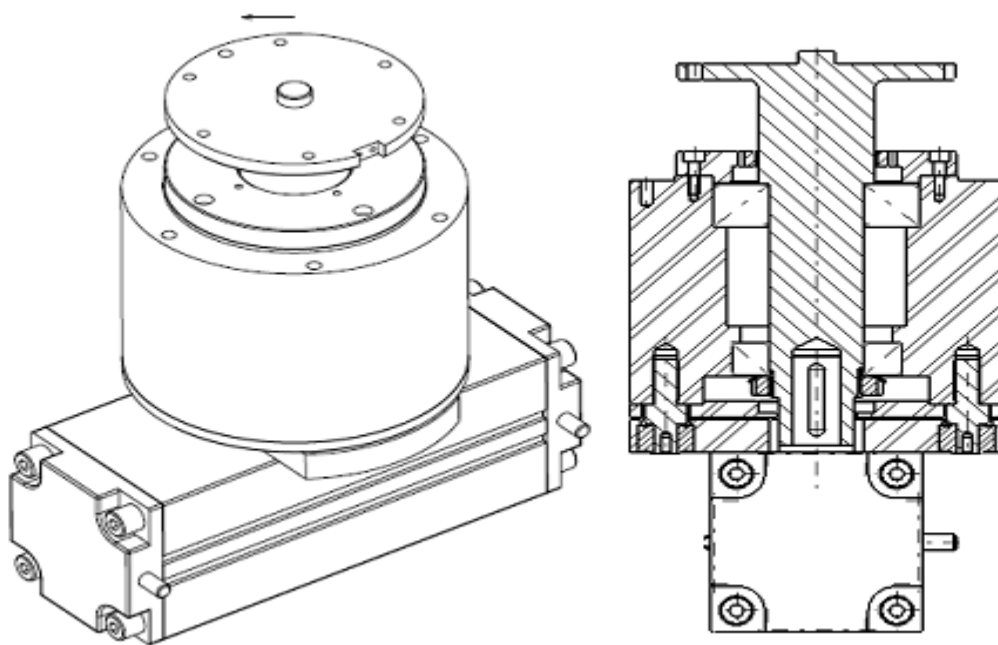


Obrázek 22 – Layout výrobní haly

Na současném stroji je koncept pohonu stolu řešen pomocí pneumatiky. Pneumatické pohony jsou konstrukčně jednoduché a cenově výhodné. Dále se tyto pohony vyznačují nízkou hmotností, vysokou přesností v krajních polohách ($0,025\text{ mm}$) a minimální náročností na údržbu. Pro výměnu pneumatického pohonu za jiný typ svědčí i to, že při nízkých tlacích vzduchu mají válce malou sílu a nízkou rychlost pohybu. Jedním z aspektů je, že vlivem tlakových ztrát a stlačitelnosti vzduchu jsou tyto pohony méně efektivní, jako jiné. Pneumatický pohon je možné nahradit hydraulickým pohonem nebo elektrickým pohonem. Pro naši aplikaci není vhodný hydraulický pohon, protože nepotřebujeme vysoké síly a hydraulický pohon je robustní a jeho systém vyžaduje spoustu komponentů. Nejvhodnějším pohonem pro stroj pro laserové svařování je pohon elektrický. Elektrické pohony mohou být přesně řízeny a poskytují kompletní kontrolu nad pohybem. Jediným záporným aspektem je pořizovací cena elektrického pohonu.

6.1.1. Úprava pohonu otočného stolu

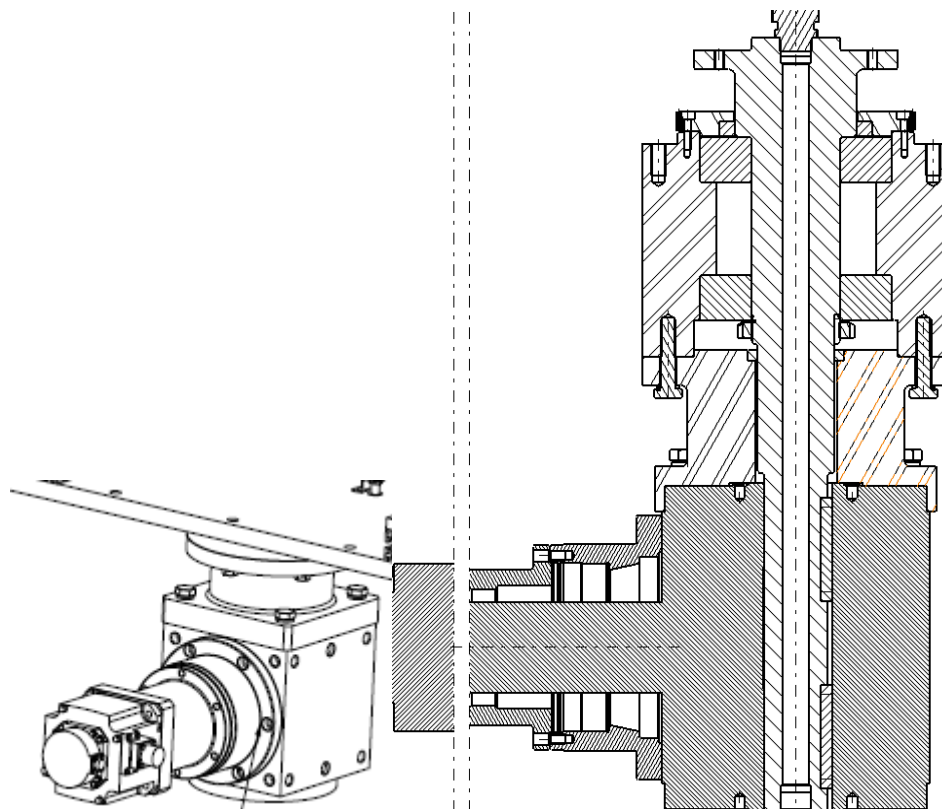
Současný pneumatický pohon je od firmy SMC typ CRA1-Z. U pneumatického pohonu tohoto typu je možné nastavovat polštářový ventil pomocí klasického šestihranného klíče. Váha pneumatického pohonu ve velikosti 100, který je v našem případě použit, je 7,3 kg. Tento pneumatický pohon je osazen škrťacím ventilem a zámkem na vstupu i výstupu. Tyto součásti slouží k regulaci rychlosti otáčení. V případě stroje pro laserové svařování jsou použity externí dorazy a tlumiče v koncových polohách. Samotný válec je ovládán 5/3 ventilem. Zámky jsou spojeny do jednoho výstupu a ovládané 2 x 3/2 ventilem. Pro zvýšení bezpečnosti obsluhy stroje je do obvodů zámků zapojen tlakový snímač. Znázornění konstrukčního řešení je na obrázku 23.



Obrázek 23 - Řešení pomocí pneumatického pohonu SMC CRA1-Z

Původní pneumatický pohon nahradíme elektrickým servopohonom firmy Mitsubishi Electric typ HG-SR1024. Tento servopohon má výkon 1.0 kW s maximální rychlostí 3000 min^{-1} . Váha tohoto servopohonu je 8,2 kg. Tímto servopohonom poháníme kuželovou převodovku firmy Apex Dynamics, Inc. typ AT-FC. Váha této převodovky je 2,5 kg. Pro zajištění kontroly správné polohy otočného stolu jsme použili na místo externích dorazů a tlumičů senzor přiblížení od firmy Euchner typ CIT3PL1-30, který má protikus v přípravku a tím jsme schopni rozpoznat, kde se přípravek právě nachází. Po otočení stolu do koncové pozice dojde k aretaci v pozici. Díky použití servopohonu jsme schopni nejen velmi jednoduše kontrolovat průběh otáčení stolu, ale také rychlost jeho otáčení.

Naposlední výhodou použití servopohonu je nízká hluchnost. Znázornění konstrukčního řešení je znázorněno na obrázku 24.



Obrázek 24 - Řešení pomocí servomotoru Mitsubishi Electric HG-SR1024

6.2. Kontrola zvýšení produktivity

Díly, které jsou svařovány na zařízení pro laserové svařování jsou používány na projektu předních světlometů VW Golf A7 poslední generace. Jedná se o dekorativní skupinu rámečku, která se skládá ze dvou dílů. Jeden z čirého materiálu a jeden z černého materiálu, které můžeme vidět na obrázku 15. Tyto díly jsou zkontrolovány na dekorativní neshody a následně ručně založeny obsluhou do přípravku upevněného ve stroji. V našem případě vzhledem k velikosti dílu jsou zakládány dvě skupiny dílů do jednoho přípravku. Po založení obsluha odstartuje strojní cyklus během kterého proběhne svaření dílů do skupiny.

Pro prověření rychlostí jsem provedl celkem deset měření strojního času na stroji s pneumatickým pohonem a ty samá měření na obdobném stroji se servopohonem a naměřené hodnoty jsem porovnal mezi sebou, tak aby bylo jasné, který ze strojů je efektivnější. Strojní čas cyklu byl měřen od stisknutí tlačítka pro zahájení strojního cyklu obsluhou na stroji po otočení stolu zpět do výchozí pozice a otevření dvěří se svařenými kusy.

Tabulka 6 - Naměřené hodnoty

Měření	Pneumatický pohon	Servo pohon
1	44	40,1
2	43,8	39,9
3	44	40
4	43,9	40
5	44,1	39,9
6	43,8	40
7	44	40,1
8	43,9	40
9	44	40
10	44	40

Z naměřených hodnot je na první pohled vidět, že změna pohonu otočného stolu nám urychlila cyklus v průměru o 2 s. Strojní čas trval každé měření velice podobně s minimální odchylkou. Uzavření ochranných dveří 7 s, otočení stolu do pracovní pozice 4 s, cyklus svařování 22 s, otočení stolu do výchozí pozice 4 s a otevření dveří 7 s. V případě použití servopohonu byl čas otáčení stolu o 2 s rychlejší. Což v našem případě znamená úsporu 4 s za cyklus. Pro vypočítání vyrobených kusů dílců na obou typech zařízení použijeme vzorec (2).

$$\frac{Pcs.}{year} = \frac{\frac{weeks}{year} \times \frac{shifts}{week} \times \frac{hours}{shift} \times 3600 \times V_t}{CT} \quad (2)$$

V našem případě bude vzorec pro výpočet výstupu hotových výrobků z pracoviště poskládaný z následujících hodnot. Uvažujeme-li, že máme osmihodinovou směnu, tedy tři směny denně a to je patnáct směn týdně. Pracovních týdnů v roce je 52. Z osmihodinové směny je pro práci využitelných 7,5 hodiny. Uvažujeme-li, že budeme na našem pracovišti svařovat pouze jeden typ výrobku je hodnota V_t rovna 85 %. Ve zbylých 15 % je započítána údržba stroje a přípravku. Dále jsou v tomto započítány prostoje, snížení výkonu a díly, které se neshodují s kvalitativním požadavkem. Jako cyklus čas stroje jsem použil průměr z naměřených hodnot. Pro pneumatický pohon otočného stolu je průměrná hodnota strojního cyklu rovna 43,9 s a pro servopohon 40 s.

Pro případ s penumatickým pohonem:

$$\frac{52 \times 15 \times 7,5 \times 3600 \times 0,85}{43,9} = 407768 ks / rok \quad (2)$$

Pro případ se servopohonem:

$$\frac{52 \times 15 \times 7,5 \times 3600 \times 0,85}{40} = 447525 \text{ ks / rok} \quad (2)$$

Z výsledků vidíme, že i drobné urychlení cyklu svařování vede k značnému navýšení vyrobených kusů za rok. S vyšším množstvím vyrobených kusů na daném zařízení vzniká možnost většího využití zařízení pro projekty o větších ročních objemech nebo pro pružnější sdílení zařízení mezi projekty.

7. Výpočet návratnosti investice

Pro výpočet doby návratnosti investice je nutné znát ziskovost zařízení. V našem případě to znamená cenu dílu, vyráběného na daném pracovišti. Cenu dílu si vypočteme z hodinové sazby pracovníka, který na daném pracovišti díly zakládá do přípravku. Tato hodnota je rovna 42,9 EUR. Výpočet provedeme následovně. V přípravku jsou každý cyklus což je cca 40 s vyrobeny 2 ks skupin to znamená, že teoreticky za jednu minutu zvládneme vyrobit kusy 3. Vynásobíme-li 3 ks 60 dostaneme produkci za hodinu. Následně podělíme hodinovou sazbu pracovníka počtem vyrobených dílů a získáme cenu jednoho vyrobeného dílu. V našem případě je cena výsledného dílu 0,20 EUR vypočteného z vzorce 3.

$$\frac{42,9}{(60 \times 3)} = 0,24 \text{ EUR} \quad (3)$$

Pro výpočet ROI je potřeba znát výnos daného pracoviště. Uvažujeme-li nejlepší scénář a to takový, že na pracovišti vyrobíme za rok to co na daném pracoviště jsme schopni vyrobit. Čistý výnos pracoviště tedy vypočítám následovně.

Pro případ s pneumatickým pohonem:

$$0,24 \times 407768 = 97864 \text{ EUR} \quad (4)$$

Pro případ se servomotorem:

$$0,24 \times 447525 = 107406 \text{ EUR} \quad (4)$$

Další důležitou informací je investice. V našem případě je to cena zařízení, a to hlavně na optimalizovaném zařízení se servomotorem. Tato částka byla spočítána na 126 300 EUR, oproti zařízení s použitím pneumatického pohonu, které stojí 119 600 EUR. Rovnici pro výpočet návratnosti investice jsem požil z teoretické části práce (1).

Pro případ s pneumatickým pohonem:

$$ROI = \frac{97864}{119600} \times 100 = 81,8\% \quad (1)$$

Pro případ se servomotorem:

$$ROI = \frac{107406}{126300} \times 100 = 85\% \quad (1)$$

Z výpočtu vidíme, že návratnost investice v prvním roce se nám díky úpravě pohonu otočného stolu vyplatí. Investice se v případě nejlepšího scénáře vrátí z 85 %, což je o 3,2 % rychleji než u levnější varianty s pneumatickým pohonem. Díky tomuto zásahu do konceptu zařízení se toto zařízení stane flexibilnější než zařízení v současném stavu.

8. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo prověření možného zvýšení produktivity zařízení pro laserové svařování plastů. V práci je provedena studie současného zařízení využívaného pro laserové svařování. Dále je v práci proveden návrh a rozbor možných řešení. Výsledkem práce je výpočet zhodnocení efektivnosti investic.

V teoretické části je popsána problematika laserového svařování. Jsou popsány důležité parametry svařování a používané svařovací metody, které jsou popsány. Dále je v této části rozdělení plastů a definice jejich svařitelnosti za pomoci laseru. Obsahem této části je také seznámení s produktem a danou problematikou svařování plastových komponent při výrobě světlometů.

Experimentální část se věnuje analýze univerzálního zařízení pro laserové svařování plastů. Úkolem experimentální části bylo rozebrat možnosti produktivity a tyto možnosti rozebrat. Řešené varianty, které by mohli vést k zvýšení produktivity byli navýšení počtů laserových sestav a výměna pohonu otočného stolu zařízení. Návrhem řešení dvou laserových sestav se došlo nato, že by se skoro dvojnásobně zvětšil rozměr pracoviště, což v zástavbě layoutu montážní linky je neproveditelné. Přesun pracoviště do jiné montážní haly či do jiné pozice v rámci haly by se nevyplatil vzhledem k nutnosti následných manipulačních prací a nutného zaskladňování výsledných skupin. V neposlední řadě se jednalo o cenu, která by se diametrálně navýšila a to by byla vysoká zátěž pro vyráběné skupiny pro daný projekt. Nejvhodnějším řešením v dané situaci byla výměna pohonu otočného stolu. V současném konceptu se využívá pneumatického pohonu a po optimalizaci zařízení by se využívalo servopohonu. Oba pohony byly popsány a následně vyzkoušeny. Z měření bylo jasně viditelné zrychlení strojního času servopohonu oproti pneumatickému pohonu.

V rámci zjištění provedených v experimentální části byla vypočítána návratnost investice, která byla ukazatelem pro výhodnost investice. Výsledek tohoto výpočtu byl v kladných číslech a tudíž by se tato optimalizace vyplatila provést. Investice by se v prvním roce pořízení vrátila z 85 % což je rozdíl přibližně o 4 % více, než u současného řešení zařízení. Výpočty návratnosti investice a ceny zařízení byly upraveny o v této práci nezveřejněný koeficient.

Seznam použité literatury

- [1] **ION, J. C.** *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*, 2011. 574 p. ISBN 978-0080971896.
- [2] **ASM.** *Handbook volume 6 Welding, Brazing and Soldering*, 1996. 1299 p. ISBN 0-87170-377-7(V1).
- [3] Lao.cz [online]. 2013-02-19 [cit. 2016-12-12] *Seriál na téma lasery – Základní princip laseru a jejich dělení*. Dostupné z www. <<http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>>.
- [4] **ANTEC 2000.** *Plastics The Magical Solution, Volume 1 Processing*, 2000. 944 p. ISBN 978-1-59124-011-2.
- [5] Lascam.cz [online]. 2015-08-02 [cit. 2016-12-14] *Rozdělení laserů*. Dostupné z www. <<http://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>>.
- [6] Lintech.cz [online]. [cit. 2016-12-20] *Co je laserová technologie?* Dostupné z www. <<http://www.lintech.cz/co-je-laserova-technologie>>.
- [7] **TROUGHTON, M.J.** *Handbook of Plastics Joining – A Practical Guide (2nd Edition)*, 2008. 600 p. ISBN 978-0-8155-15814.
- [8] Lt.cz [online]. [cit. 2016-12-30] *Svařování polymerních plastů laserem*. Dostupné z www. <<http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?start=20>>.
- [9] **GILBERT M.** *Brydson's Plastics Materials (8th Edition)*, 2016, 944 p. ISBN 978-0323370226.
- [10] **LEGRAND, D. BENDLER, J.T.** *Handbook of Polycarbonate Science and Technology (Plastic Engineering)*, 2000, 374 p. ISBN 0-8247-9915-1.
- [11] Publi.cz [online]. [cit. 2017-05-05] *Rozdělení a charakteristika polymerů*. Dostupné z www. <<https://publi.cz/books/180/04/>>.
- [12] **FRICK, T. HOPFNER M.** *Laser Welding of Thermoplastics: User Handbook (1st Edition)*, 2007. 654 p. ISBN 3-9809601-3-7.
- [13] LPKF-laserwelding.com [online]. [cit. 2017-01-02] *Laser Plastic Welding*. Dostupné z www. <http://www.lpkf-laserwelding.com/_mediafiles/1546-brochure-laser-plastic-welding-.pdf>.

- [14] **POTENTE, H.** *Fügen von Kunststoffen Grundlagen, Verfahren, Anwendung (1st Edition)*, 2004. 348 p. ISBN 3-446-22755-6.
- [15] **EHRENSTEIN, G. W.** *Handbuch Kunststoff – Verbindungstechnik (1st Edition)*, 2004. 710 p. ISBN 3-446-22340-1.
- [16] **NEČAS, L.** *Ekonomika a management [CD-ROM]*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2777-3.
- [17] lpkfusa.com [online]. [cit. 2017-05-11] *Design Guidelines: Hybrid Laser Welding*. Dostupné z www. <https://www.lpkfusa.com/articles/lq/LPW_GL_Hybrid_Laser_Wedling_Design_Guidelines.pdf>
- [18] LPKF-laserwelding.com [online]. [cit. 2017-05-15] *Hybrid Welding of Large, Copmex Parts*. Dostupné z www. <http://www.lpkf-laserwelding.com/_mediafiles/1928-twinweld3d-brochure.pdf>